

**В. В. ГУСЕВ**, д-р техн. наук, **Л. П. КАЛАФАТОВА**, д-р техн. наук,  
**С. Ю. ОЛЕЙНИК**, Донецк, Украина

## **ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗ СИТАЛЛОВ**

В статье представлена расчетная схема для исследования динамического состояния технологической системы алмазно-абразивной обработки тонкостенных оболочек вращения сложной формы из ситалла. Определены показатели, которые необходимо учитывать при создании математической модели динамических процессов, происходящих в системе во время обработки.

В статті представлена розрахункова схема для дослідження динамічного стану технологічної системи алмазно-абразивної обробки тонкостінних оболонок обертання складної форми з ситалу. Визначені чинники, які необхідно враховувати при створенні математичної моделі динамічних процесів, що відбуваються в системі під час обробки.

*V. V. GUSEV, L. P. KALAFATOVA, S. Ju. OLEJNIK*

### *SUBSTANTIATION OF THE SETTLEMENT SCHEME FOR RESEARCH OF THE DYNAMIC CONDITION OF TECHNOLOGICAL SYSTEM OF DIAMOND-ABRASIVE PROCESSING THIN-WALLED ENVIRONMENTS FROM GLASSCERAMICS*

The article presents a design scheme for the study of the dynamic state of the technological system of diamond-abrasive processing of glass-ceramic's thin-walled shells of complex shape. Indicators that must be considered for creating mathematical models of dynamic processes occurring in the system during processing were determined .

#### *Введение*

С развитием науки и техники перед современным машиностроением ставится ряд многообразных задач, одна из которых - надежное обеспечение технических характеристик изделий типа конструкций, работающих в широком диапазоне температур, при сложном сочетании переменных силовых и тепловых воздействий, в агрессивных рабочих средах. Часто условия эксплуатации изделий таковы, что для их изготовления невозможно или нерационально использовать металлы. В таких случаях задача решается за счет разработки и внедрения неметаллических материалов, к которым относятся различные виды технической керамики, в том числе и ситаллы. Ситаллы обладают комплексом требуемых прочностных и эксплуатационных характеристик, среди которых следует отметить высокую твердость, высокую сопротивляемость сжатию при низкой удельной плотности, термостойкость, устойчивость к силовой напряженности и внешнему гидро-

статическому давлению. Эти свойства делают хрупкие неметаллические конструкционные материалы наиболее пригодными для применения в условиях агрессивных сред океана и космоса, в самолето- и ракетостроении. Специфика эксплуатации таких изделий предопределяет повышенные требования к точности изготовления и прочностным характеристикам, которые для материалов рассматриваемого класса в значительной степени определяются шероховатостью обработанной поверхности и сведением к минимуму дефектов поверхностного слоя.

Проведенными исследованиями [1-5] было установлено, что для обеспечения необходимых показателей по точности и качеству для крупногабаритных тонкостенных деталей типа оболочек из ситаллов при обработке технологических процессов (ТП) их механической обработки, в основном реализуемой шлифованием, необходимо учитывать динамику процесса шлифования. Для изучения динамических явлений необходимо иметь точные данные о состоянии элементов системы СПИД и их влиянии на виброустойчивость системы при обработке конкретных изделий.

Было установлено, что шлифование крупногабаритных пустотелых изделий из конструкционной керамики и ситаллов по внутреннему и внешнему контурам сопровождается возникновением сложных колебаний различной природы: вынужденных, параметрических и автоколебаний. В работах [1, 2] представлены результаты, подтверждающие, что вибрации, возникающие в системе при шлифовании оболочек из ситалла, снижают качество поверхности, так как уровень вибраций из-за физико-механических свойств ситаллов оказывает прямое влияние на глубину дефектного слоя, вызванного обработкой. Устранение причин возникновения вибраций предполагает необходимость моделирования процесса шлифования изделий и поведения технологической системы, его реализующей, с учетом динамических характеристик элементов самой системы. Разработка математических зависимостей, которые адекватно моделируют поведение технологической системы, является основой для решения задачи обеспечения параметров качества и точности обрабатываемых шлифованием поверхностей.

*Целью* данной работы является построение принципиальной и эквивалентной схем упругой системы алмазно-абразивной обработки тонкостенных крупногабаритных изделий из ситалла, а также анализ состояния элементов системы с учетом особенностей обрабатываемой заготовки как замкнутой тонкостенной оболочки вращения сложной формы.

#### *Изложение основного материала*

Обрабатываемая деталь – оболочка сложной формы, состоящая из трех частей: конической, параболической и цилиндрической. Таким образом, в конической и параболической своих частях заготовка имеет переменный радиус кривизны. Условно оболочку можно отнести к тонкостенной, если отношение ее толщины к минимальному радиусу кривизны не

превышает 1/20 [6]. Для рассматриваемого диапазона размеров заготовок это условие не всегда выполняется для конической части заготовки.

Заданное качество и точность изделия закладываются на этапах многостадийной алмазно-абразивной обработки, в результате чего формируются профиль детали, ее размерные характеристики, волнистость, шероховатость, определенный уровень дефектности обработанной поверхности. На черновых и получистовых операциях, на которых снимается основной припуск (до 8...9 мм на сторону), алмазно-абразивная обработка ведется способом глубинного шлифования (глубина резания 0,5...1,5 мм), которое сопровождается хрупким разрушением обрабатываемого материала.

Алмазно-абразивная обработка тонкостенных оболочек вращения сложной формы из ситаллов, производится на модернизированных токарных станках РТ60622, оснащенных агрегатной шлифовальной головкой и системой прямого копирования. На рисунке 1 показана схема установки детали на станочном приспособлении – консольной оправке в координатах XZ.

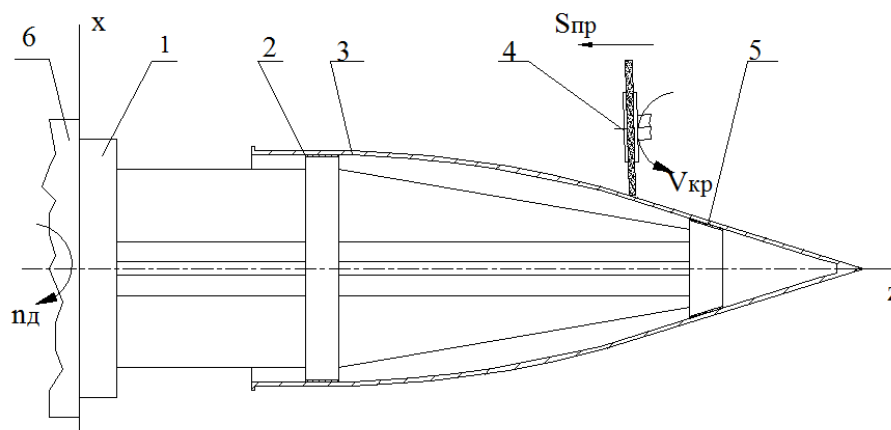


Рисунок 1 – Схема технологической системы при наружном круглом шлифовании детали – тонкостенной оболочки вращения из ситалла: 1 – оправка; 2, 5 – втулки из гетинакса (элементы приспособления – оправки); 3 – обрабатываемая деталь; 4 – шлифовальный круг IAI 200x10x3x76 AI – 315/250-4- M2-01, установленный в агрегатной головке; 6 – шпиндель станка

Проведенный комплекс исследований и теоретико-экспериментальный анализ динамического состояния элементов системы [3-5] показал следующее. Было установлено, что в подсистеме станка «двигатель - коробка скоростей - заготовка» не возникают крутильные колебания, влияющие на точность обработки. Так же выполненный расчет динамических характеристик шпиндельного узла станка свидетельствует о том, что в подсистеме «шпиндельный узел станка - приспособление - заготовка» возникают вынужденные изгибные колебания, которые могут оказывать влияние на качественные характеристики процесса шлифования и, как следствие, на точность обработки изделия. Причиной этого является низкая и переменная по длине заготовки жесткость, что приводит к динамической

неустойчивости процесса резания, наличию вибраций, интенсивность которых меняется в зависимости от схемы обработки, места контакта заготовки с инструментом. В рассматриваемых случаях уровень вибраций определялся по результатам расшифровки профилограмм образцов обработанной поверхности [2], позволившим по величине ее волнистости судить об относительном уровне вибраций. Исследования особенностей вынужденных колебаний подсистемы «приспособление-заготовка» [5] также показали переменную интенсивность уровня вибраций по длине заготовки, сходную с экспериментальной кривой амплитуды колебаний. На рис. 2 по длине заготовки относительно оси  $Z$  приведены динамические и упругие показатели подсистемы «шпиндельный узел–приспособление-заготовка».

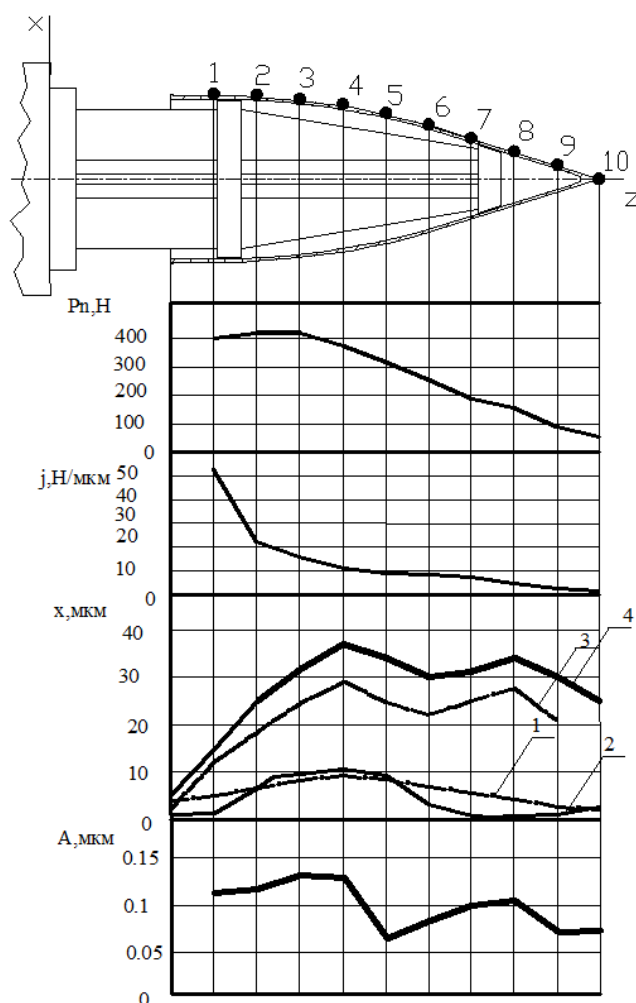


Рисунок 2 – Сравнительные диаграммы изменения динамических и упругих характеристик подсистемы «шпиндельный узел – оправка - заготовка» вдоль оси детали:  $P_n$  – нормальной составляющей силы резания, Н;  $j$  – изгибной жесткости, Н/мкм;  $x$  – статических прогибов, мкм (1 – суммарные радиальные перемещения шпиндельного узла, 2 – радиальные перемещения обрабатываемой заготовки, 3 – радиальные перемещения подсистемы «приспособление-заготовка», 4 – суммарные радиальные перемещения подсистемы «шпиндельный узел - приспособление-заготовка»);  $A$  – амплитуды вибраций, мкм.

Однако полученные теоретические данные имели некоторые расхождения с их экспериментальными значениями. Это можно объяснить следующим. При моделировании не были учтены ряд свойств обрабатываемой заготовки как замкнутой тонкостенной оболочки, а также факторы, связанные с механической обработкой детали на специальном станке, что требует решения задачи моделирования поведения системы при шлифовании на более высоком уровне.

Рассматриваемая технологическая система круглого шлифования крупногабаритной тонкостенной оболочки вращения из ситалла представляет собой сложную механическую систему. В процессе исследований была разработана принципиальная схема упругой системы алмазно-абразивной обработки тонкостенной оболочки из ситалла, которая представлена на рисунке 3.

Далее рассматривается случай, когда шлифовальная головка взаимодействует с обрабатываемой заготовкой на участке ее параболической части, в районе точек 3 и 4, показанных на рисунке 2, где прослеживаются максимальные вибрации технологической системы. На схеме элементы системы обозначены следующим образом: обрабатываемая заготовка  $m_2$ ; оправка, на которой установлена заготовка,  $m_3$ ; инструмент (алмазный круг)  $m_1$ . Такую принципиальную схему с учетом ряда допущений можно привести к эквивалентной расчетной схеме, показанной на рисунке 4.

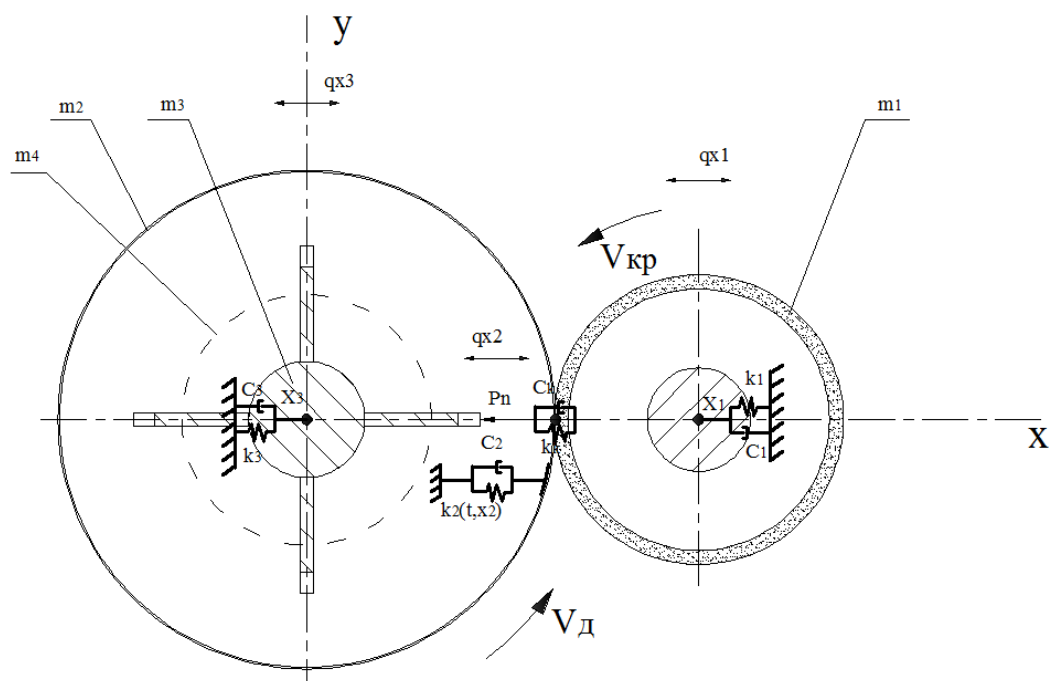


Рисунок 3 – Принципиальная схема упругой системы алмазно-абразивной обработки тонкостенной оболочки вращения из ситалла

Динамические характеристики рассматриваемой системы (см. рис. 3, 4) обозначены следующим образом:  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$  – приведенные массы,

соответственно, агрегатной шлифовальной головки с инструментом, обрабатываемой заготовки (оболочки вращения), оправки, закрепленной в шпинделе станка, на которой установлена заготовка, и шпиндельного узла;  $k_1, k_2, k_3, k_4$  – соответственно, приведенные жесткости агрегатной головки, обрабатываемой заготовки, оправки, шпиндельного узла;  $c_1, c_2, c_3, c_4$  – линейные коэффициенты демпфирования, показывающие величину рассеивания энергии рассматриваемых элементов, соответственно, агрегатной головки, обрабатываемой заготовки, оправки, шпиндельного узла.

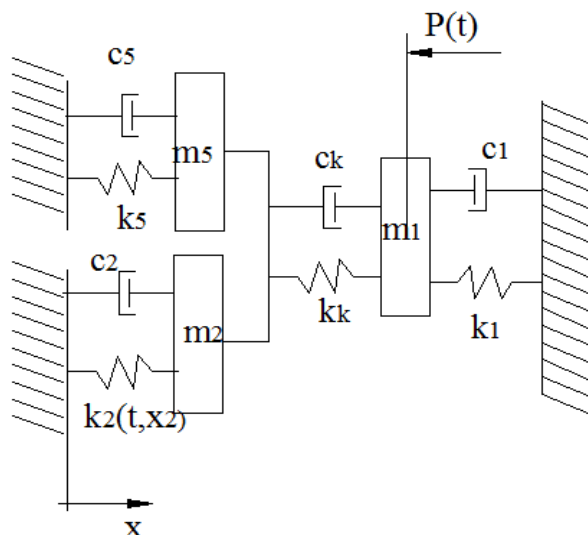


Рисунок 4 – Эквивалентная расчетная схема упругой системы алмазно-абразивной обработки тонкостенной оболочки вращения

Отдельно можно рассмотреть показатели, обозначенные как  $c_k, k_k$ , которые характеризуют динамические явления, происходящие в зоне контакта инструмента и изделия. Эти показатели зависят от свойств обрабатываемого материала заготовки, свойств инструмента, режимов резания.  $P(t)$  – гармоническая возмущающая сила, вызванная биением шлифовального круга и изменением его формы в процессе обработки.

$$P(t) = P_0 + \sum_{i=1}^n P_i \sin \omega t,$$

где  $P_0$  – постоянная возмущающая сила, возникающая при работе правильно установленным шлифовальным кругом идеальной формы;  $i$  – гармоники, обусловленные:  $i = 1$  – дисбалансом (биением) круга из-за, например, неправильной его установки,  $i = 2$  – отклонением формы круга от идеальной;  $P_i$  – силы, вызванные перечисленными выше явлениями, возникающими в процессе шлифования;  $\omega$  – круговая частота.

Центры обрабатываемой заготовки, оправки и шпиндельного узла находятся в одной точке  $X_3$  (см. рис. 3) и лежат на одной оси  $Z$ , поэтому на эквивалентной схеме (см. рис. 4) обозначена приведенная масса  $m_5$  подсистемы «шпиндельный узел – оправка - деталь». Соответственно, приведенные жесткость и коэффициент демпфирования этой подсистемы обозначены как  $c_5$  и  $k_5$ .

В процессе обработки возбуждающая сила одновременно вызывает множество разных форм колебаний системы, среди которых основные, оказывающие влияние на качество обработки, это изгибные колебания подсистемы заготовки - оболочки и ее радиальные колебания. Поэтому в эквивалентной (расчетной) схеме в отдельном узле  $m_2$  представлена упруго-диссипативная характеристика обрабатываемой заготовки.

Силовой баланс для динамического описания технологической системы по эквивалентной схеме, представленной на рис. 4, можно представить в виде следующих дифференциальных уравнений.

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = (c_1 - c_k) \dot{x}_1 + c_k \dot{x}_2 + (k_1 - k_k) x_1 + k_k x_2 - P(t) \\ m_2 \ddot{x}_2 = (c_k - c_2) \dot{x}_2 - c_k \dot{x}_1 + (k_2(t, x_2) + k_k) x_2 - k_k x_1 \\ m_5 \ddot{x}_5 = (c_k - c_5) \dot{x}_5 - c_k \dot{x}_1 + (k_k - k_5) x_5 - k_k x_1 \end{cases}$$

Результатом решения дифференциальных уравнений должны быть амплитуды относительных колебаний элементов технологической системы алмазно-абразивной обработки тонкостенной оболочки вращения.

Особенность рассматриваемой технологической системы состоит в том, что обрабатываемая деталь является тонкостенной оболочкой вращения, что накладывает дополнительные условия на моделирование технологической системы СПИД как динамической системы. Так фактически дифференциальное уравнение для  $m_2$  должно моделировать движение элемента оболочки, находящегося в зоне контакта шлифовального круга с деталью. Описание движения элемента оболочки возможно с применением теории оболочек после приведения рассматриваемой системы к дискретной модели. Для этого нужно определить условия, при которых возникают колебания оболочки во время обработки в рассматриваемой технологической системе.

На заготовку - тонкостенную оболочку, вращающуюся с постоянной частотой, во время шлифования воздействует локальная сосредоточенная периодическая сила (имеющая частоту возбуждающей силы), перемещающаяся вдоль оси детали со скоростью, соответствующей заданной подачи. Анализ литературы [7-9] показал, что это можно рассматривать как факт динамического воздействия подвижной нагрузки на поверхность оболочки,

вызывающего повышение амплитуды колебаний. Величины прогибов в системе, определяемые с учетом и без учета подвижности нагрузки, сильно различаются между собой. Для тонкостенных оболочек движение нагрузки вызывает резкое увеличение прогибов. Величина динамического прогиба зависит от параметров и геометрии оболочки, свойств материала, из которого она изготовлена, а также от скорости и направления движения нагрузки. Также решающую роль в возрастании амплитуды колебаний играет увеличение скорости движения нагрузки при перемещении от конической части детали к цилиндрической.

Вторым фактором, без учета которого невозможно построить математическую модель рассматриваемой технологической системы, является необходимость учета изменения жесткости системы с ростом напряжений в ее элементах, или учета эффективной жесткости [10], что представляет собой повышение или снижение способности конструкции сопротивляться действующим нагрузкам при изменении ее напряженного состояния. Этот эффект является следствием взаимовлияния продольных и поперечных прогибов в системе, и его обычно требуется учитывать при анализе тонкостенных конструкций, изгибная жесткость которых весьма мала по сравнению с жесткостью в продольном направлении. Переменная жесткость способствует возникновению параметрических колебаний тела оболочки, что также усложняет решение задачи

*Выводы.* Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали наличие вредных вибраций при шлифовании тонкостенных оболочек вращения из ситаллов. При этом величина и форма колебаний зависят не только от динамических характеристик металлорежущего оборудования и инструмента, но и от геометрии и упругих свойств обрабатываемой заготовки. Предложена эквивалентная схема упругой системы алмазно-абразивной обработки оболочек из ситалла, которую предполагается внести как основу при разработке математической модели системы шлифования с учетом динамического фактора. При моделировании будут учитываться упруго-диссипативные свойства обрабатываемой оболочки, а также факт динамического воздействия подвижной нагрузки на неё в процессе шлифования.

**Список использованных источников:** 1. Гусев В.В. Влияние виброустойчивости системы шлифования на структуру дефектного слоя ситаллов / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова и др. // Резание и инструмент в технологических системах. Международный научно-техн. сборник. – Х., 2006. – Вып. 70. – С. 154-161. 2. Гусев В. В. Обоснование и разработка способа повышения производительной обработки изделий из ситаллов: автореферат дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / Гусев Владимир Владленович. – М.: МВТУ, 1986.



– 18 с. **3.** Гусев В.В. Исследование динамических характеристик элементов системы СПИД при шлифовании деталей сложной пространственной формы из ситаллов / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова и др. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, 2007. – Вип. №21. – С. 148 – 155. **4.** Калафатова Л.П. Влияние состояния элементов системы СПИД на виброустойчивость процесса шлифования крупногабаритных изделий из ситаллов / Калафатова Л.П., Каракуц И.С. и др. // Инженер. - Донецк: ДонНТУ, 2007. – Вип. 8. – С. 50-55. **5.** Гусев В.В. Повышение качества алмазного шлифования тонкостенных оболочек из ситалла путем снижения вибраций в технологической системе / Гусев В.В., Калафатова Л.П., Олейник С.Ю. // Наукові праці ДонНТУ– Донецк, 2010. – Вип. № 7(166).– С. 156-167. **6.** Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле / Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У.— М.: Машиностроение, 1985. — 472 с. **7.** Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек / А.С. Вольмир. – М.: Наука, 1972. – 432 с. **8.** Гурьянов Н. Г. Замкнутая цилиндрическая оболочка под действием сосредоточенной силы / Исслед. по теор. пластин и оболочек. - Изд-во Казанского ун-та, Казань, 1966 .- Вип. 4. – С. 55–64. **9.** Якушев Н. З. Динамика тонких пластин и оболочек под воздействием движущихся инерционных нагрузок / Исследования по теории пластин и оболочек / Изд-во Казанского ун-та, Казань, 1973. – Вип. 10. – С. 391–401. **10.** Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). - Т. 1. Колебания линейных систем / Под ред. В. В. Болотина. - М.: Машиностроение, 1978. - 352 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Gusev V.V. Vlijanie vibroustojchivosti sistemy shlifovaniya na strukturu defektnogo sloja sitallov / V.V. Gusev, L.P. Kalafatova i dr. // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah. Mezhdunarodnyj nauchno-tehn. sbornik. – H., 2006. - Vyp. 70. – S. 154-161. 2. Gusev V. V. Obosnovanie i razrabotka sposoba povysheniya proizvoditel'noj obrabotki izdelij iz sitallov: avtoreferat dis. kand. tehn. nauk: 05.02.08 / Gusev Vladimir Vladlenovich. – M.: MVTU, 1986. – 18 s. 3. Gusev V.V. Issledovanie dinamicheskikh harakteristik jelementov sistemy SPID pri shlifovanii detalej slozhnoj prostranstvennoj formy iz sitallov / V.V. Gusev, L.P. Kalafatova i dr. // Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih sistem. Zbirnik naukovih prac'. – Kramators'k, 2007. – Vip. №21. – S. 148 – 155. 4. Kalafatova L.P. Vlijanie sostojanija jelementov sistemy SPID na vibroustojchivost' processa shlifovaniya krupnogabaritnyh izdelij iz sitallov / Kalafatova L.P., Karakuc I.S. i dr. // Inzhener. - Doneck: DonNTU, 2007. – Vip. 8. – S. 50-55. 5. Gusev V.V. Povyshenie kachestva almaznogo shlifovaniya tonkostennyh obolochek iz sitalla putem snizheniya vibracij v tehnologicheskoy sisteme / Gusev V.V., Kalafatova L.P., Olejnik S.Ju. // Naukovi prac'i DonNTU– Doneck, 2010. – Vip. № 7(166).– S. 156-167. 6. Timoshenko S. P. Kolebanija v inzhenernom dele / Timoshenko S. P., Jang D. X., Uiver U.— M.: Mashinostroenie, 1985. — 472 s. 7. Vol'mir A.S. Nelinejnaja dinamika plastinok i obolochek / A.S. Vol'mir. – M.: Nauka, 1972. – 432 s. 8. Gur'janov N. G. Zamknutaja cilindricheskaja obolochka pod dejstviem sosredotochennoj sily / Issled. po teor. plastin i obolochek. - Izd-vo Kazanskogo un-ta, Kazan', 1966 .- Vyp. 4. – S. 55–64. 9. Jakushev N. Z. Dinamika tonkih plastin i obolochek pod vozdejstviem dvizhuvihsja inercionnyh na-gruzok / Issledovanija po teorii plastin i obolochek / Izd-vo Kazanskogo un-ta, Kazan', 1973. – Vyp. 10. – S. 391–401. 10. Vibracii v tehnike: Spravochnik. V 6-ti t. / Red. so-vet: V. N. Chelomej (pred.). - T. 1. Kolebanija linejnyh sistem / Pod red. V. V. Bolotina. - M.: Mashinostroenie, 1978. - 352 s.